

**В.М. КЕТОВ**, научн. сотру́дн., **Е.И. ДЕМЧЕНКО**, научн. сотру́дн.,  
**А.А. ВНУКОВ**, научн. сотру́дн., Национальная металлургическая  
академия Украины, г. Днепропетровск, Украина

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СПЕЧЕННЫХ КОМПОЗИТОВ С МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ МАТРИЦЕЙ**

У роботі розглянута можливість використання омедненого залізного порошку як основа для отримання дисперсно-зміцненого композиту. Як упрочнителя композиту використовували вуглецеві нанотрубки. Проведено порівняння властивостей отриманого композиту з матеріалом аналогічного складу, отриманого шляхом механічного змішування залізного порошку і порошку міді.

The paper considers the possibility of using copper covered iron powder as a basis for obtaining dispersion-hardened composite. As hardeners of composite used carbon nanotubes. A comparison of the properties of the composites with the material of similar composition obtained by mechanically mixing iron powder and copper powder.

**Постановка проблемы.** Углеродные нанотрубки (УНТ) благодаря своим высоким механическим свойствам и малым (наномерным) размерам вызывают интерес при использовании их в качестве упрочнителя для дисперсно-упрочненных материалов с металлической матрицей [1].

При введении УНТ в качестве дисперсного упрочнителя в материалы на основе железа существует вероятность возникновения термодинамической неустойчивости системы, при этом углерод из УНТ может стремиться перейти в твердый раствор во время спекания с разрушением структуры УНТ.

Известно [2], что целью их защиты от растворения в металлической агрессивной матрице используют металлические покрытия на УНТ, в том числе и медное.

Авторами разработан метод получения омедненного железного порошка, как альтернативы традиционному способу легирования спеченных конструкционных материалов на основе железа медью.

В этом случае наличие меди на поверхности частиц железного порошка тормозит диффузию углерода в железо в процессе спекания (медь не образует твердых растворов с углеродом, снижает концентрацию углерода в перлите и сдвигает точки *S* и *E* на диаграмме железо-углерод влево [3]).

Авторами данной работы предложено использование железного порошка с медным покрытием как основы для изготовления материала, в состав которого входят УНТ без покрытия.

Нанесение медного слоя на частицы железного порошка может повысить термодинамическую стабильность УНТ в железной матрице в процессе спекания.

**Цели и задачи исследования.** Цель работы состояла в изучении влияния медного покрытия на частицах железного порошка, который является основой матрицы, на поведение УНТ в ней в процессе спекания и свойства спеченного композита.

**Материал и методика исследования.** В качестве основы для изготовления матрицы композита был использован железный порошок марки ПЖР 3.200.28 (ГОСТ – 9849-86). В качестве упрочнителя использованы УНТ, произведенные методом каталитического разложения СО на никелевом катализаторе. Содержание никеля в УНТ – 5 – 15 %.

Медное покрытие на частицах железного порошка получали методом химического меднения (цементации) в кислом водном растворе сернокислой меди с добавлением сернокислого железа (II) [2].

Содержание меди в шихте – 3 %.

Для оценки эффекта присутствия медного покрытия на частицах железного порошка проводилось сравнение свойств композита на основе омедненного порошка со свойствами композита того же состава на основе смеси порошков железа и меди.

Показателем механических свойств была выбрана твердость HV, а также микротвердость внутри зерна и на границах зерен.

Образцы были изготовлены по одинаковым технологическим режимам.

УНТ имеют малую плотность по сравнению с железным порошком и склонны к образованию клубков.

В связи с этим, равномерно распределить УНТ в порошковой шихте путем сухого смешивания сложно.

Авторами был использован метод смешивания с помощью ультразвука в среде спирта.

Образцы были изготовлены методом одностороннего холодного прессования и спечены в среде водорода при температуре 1150 °C

Химический состав исследованных материалов приведен в табл. 1.

Таблица 1

## Химический состав образцов

№ образца	медь	углерод	УНТ
1	-	0,3 %	-
2	-	-	0,3 %
3	-	-	-
4	3 %	0,3 %	-
5	3 %	-	0,3 %
6	3 %	-	-
7	3 % омедненный	0,3 %	-
8	3 % омедненный	-	0,3 %
9	3 % омедненный	-	-

**Результаты исследований и их обсуждение.** Результаты измерений размера зерна образцов приведены в табл. 2.

Таблица 2

## Результаты определения размера зерен

№ образца	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Размер зерна, мкм	46,5	44,7	53,9	24,7	20,4	71,6	21,6	18,0	38,2

Как видно из таблицы, наличие УНТ в матрице ведет к измельчению зерна, для железной матрицы – на 17,1 % по сравнению с чистой матрицей, для матрицы с содержанием меди 3 % – на 71,5 %, для матрицы с содержанием меди 3 % на основе омедненного порошка – на 52,9 % по сравнению с чистой матрицей.

Результаты измерений микротвердости приведены в табл. 3. Твердость HV измерялась с нагрузкой 10 кг. Результаты измерений приведены в табл. 4.

Таблица 3

## Результаты измерения микротвердост

№ образца	Состав материала	Микротвердость внутри зерна, МПа	Микротвердость на границе зерен, МПа
1	Fe + 0,3% C	134,30	118,90
2	Fe + 0,3% УНТ	127,34	117,17
4	Fe + 3%Cu + 0,3% C	155,64	160,19
5	Fe + 3%Cu + 0,3% УНТ	187,52	126,40
7	Fe + 3%Cu + 0,3% C (омедненный)	143,93	142,10
8	Fe + 3%Cu + 0,3% УНТ (омедненный)	124,35	126,67

Таблица 4

## Результаты измерения твердости HV

№ образца	Образец на основе	Средняя твердость HV
5	Смеси порошков + 0,3% УНТ	76
8	Омедненного порошка + 0,3% УНТ	80
4	Смеси порошков + 0,3% С	89
7	Омедненного порошка + 0,3% С	84

**Выводы.**

1. Твердость материала на основе смеси порошков с добавлением углерода выше, чем аналогичного на основе омедненного порошка. В связи с этим, можно сделать вывод, что в материале на основе смеси порошков образовалось большее количество цементита (рисунок).

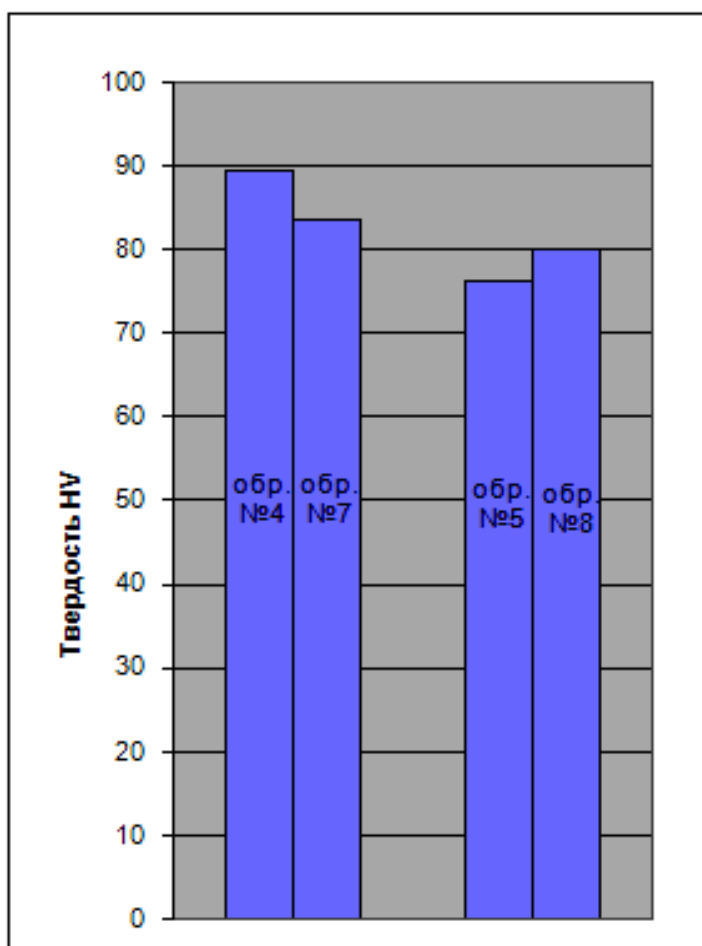


Рисунок – Результаты определения твердости образцов

Таким образом, можно предположить, что медное покрытие на частицах железа замедляет диффузию углерода в железо.

Это подтверждает тот факт, что микротвердость образца на основе смеси порошков с добавлением графита значительно больше как внутри зерна, так и на границах зерен, чем у аналогичного на основе омедненного порошка

2. Показания твердости образца на основе омедненного железного порошка с добавлением УНТ оказались выше, чем у образца на основе смеси порошков с добавлением УНТ (рисунок), что говорит о том, что УНТ в меньшей степени прореагировали с железной матрицей.

При этом упрочняющий эффект оказался выше.

Микротвердость материалов на границе зерен оказалась одинаковой, а внутри зерна у образца на основе порошковой смеси с добавлением УНТ – значительно выше, что, может свидетельствовать о том, что некоторая часть УНТ перешла в цементит.

Как показали результаты измерений, твердость у композита на основе омедненного порошка оказалась выше, чем у композита на основе смеси порошков.

Это дает возможность говорить об эффективности использования омедненного железного порошка при создании спеченных композитов на основе железа с УНТ.

**Список литературы:** 1. *Amit Goyala* Chemical Synthesis of carbide-free, high strength iron-carbon nanotube composite by in situ nanotube growth / [Amit Goyala, Donald A. Wiegand, Frank J. Owens, Zafar Iqbal] // *Physics Letters*. – 2007. – № 442. – P. 365 – 371. 2. *Богачов Д.Г.* Дослідження можливості одержання композитів з залізною матрицею і вуглецевими нанотрубками / [Д.Г. Богачов, Г.П. Стовпченко, П. Шеллер та інші.] // *Металознавство та термічна обробка металів*. – 2009. – № 3. – С. 61 – 66. 3. *Ермаков С.С.* Порошковые стали и изделия / *С.С. Ермаков, Н.Ф. Вязников*. – [4-е изд., перераб. и доп.]. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1990. – 318 с.

*Поступила в редколлегию 20.09.10*